جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی‌ام، تابستان ۱۳۹۸

صص ۲۲۹- ۲۱۱

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78609

تغییرپذیری روند عمق برف در پهنه شمالی ایران مبتنی بر پایگاه داده ECMWF نسخه ERA Interim

حبیبه نقی زاده[۱]-دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران

علی‌اکبر رسولی- استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران

بهروز ساری صراف - استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران

سعید جهانبخش - استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران

ایمان بابائیان- دکتری اقلیم‌شناسی، استادیار پژوهشکده اقلیم شناسی مشهد(مرکز ملی اقلیم)، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۷ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۳۰

چکیده

تغییرات برف در سال‌های اخیر تحت پدیده گرمایش جهانی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اهمیت این پدیده به علت خشک و نیمه‌خشک بودن بخش قابل توجهی از ایران که مناطق کوهستانی به‌عنوان تأمین کننده آب ایفای نقش می‌کنند، از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. در این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات روند عمق برف از دو روش ناپارامتریک Mann–Kendall و Sen's Slope در پهنه شمالی ایران طی دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۸۰ مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای پایگاه ECMWF نسخه ERA Interim با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی استفاده شد. نتایج نشان داد غالب روند و شیب روند به‌دست‌آمده کاهشی و معنی‌دار است. این روند کاهشی برای قزوین، زنجان، آذربایجان شرقی و تهران شدیدتر است. همچنین روند افزایشی عمق برف که در غالب ماه‌های مورد بررسی معنی‌دار نیست به‌غیراز دو ماه اکتبر و نوامبر که در البرز مرکزی مشاهده شد در سایر ماه‌ها در مناطق مرزی شمال غرب و شرق کشور مشاهده شد. فصل زمستان بیشینه روند کاهشی را نشان داده است؛ به‌طوری‌که روند کاهشی بیش از ٩٦ درصد از پهنه‌های هم‌روند را در بر گرفته است. پس از فصل زمستان به ترتیب ماه آوریل از فصل بهار و فصل پاییز بیشینه روند کاهشی را نشان داده‌اند. می‌توان اذعان داشت که زمستان‌های پهنه شمالی ایران در حال گرم‌تر شدن است که می‌توان این روند کاهشی عمق برف را در پاسخ به گرمایش جهانی یاد کرد.

کلیدواژه‌ها: روند عمق برف، پایگاه ECMWF، روش من-کندال- روش Sen's، پهنه شمالی ایران.

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۸۸۳۶۷۹۷ Email: hnaghizade89@gmail.com

۱- مقدمه

تجزیه‌وتحلیل روند در آب‌وهوا در طول دهه‌های گذشته به یک موضوع مهم تحقیقاتی تبدیل شده است، این توجه عمدتاً به دلیل اهمیت گرمایش کره زمین است. علاوه بر این، منابع مختلف اطلاعاتی به این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توان به داده‌های مشاهداتی، داده‌های باز تحلیل شده، اطلاعات ماهواره‌ای و غیره اشاره کرد. درنتیجه، بسیاری از مطالعات جهانی و منطقه‌ای که در حال حاضر در دسترس هستند بیشتر برای درجه حرارت و بارش است. سایر متغیرهای مهم آب‌وهوایی، مانند برف (پوشش و عمق برف)، توجه کمتری را به خود جلب کرده‌اند، این امر اساساً به علت فقدان اطلاعات مناسب در خصوص این پارامتر مهم آب‌وهوایی است. بااین‌حال، فراوانی و وسعت عمق برف یک پارامتر کلیدی برای بودجه آب است و روند فعلی و آینده این متغیر منبع مهمی برای اطلاعات بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی است.

برف یک جزء حیاتی از سیستم آب‌وهوایی زمین به دلیل تعامل آن با شار انرژی و رطوبت سطح در مقیاس محلی تا جهانی است. این پارامتر به‌طور قابل ملاحظه‌ای، ارتباطات مهمی را با تابش در عرض‌های بالاتر نشان می‌دهد (Dyer & Mote, 2006). بااین‌حال پارامترهای مرتبط با برف به تغییرات دمای هوا و بارش حساس هستند (Karl et al., 1993). درنتیجه، پوشش و عمق برف به‌عنوان یک شاخص مفید برای تغییرات آب‌وهوایی محسوب می‌شود. عمق برف یکی از کلیدی‌ترین متغیرها برای درک ارتباط چرخه هیدرولوژی است، دبی بسیاری از رودخانه‌ها بخصوص در دوره گرم سال عمدتاً در ارتباط با انباشت برف است که بسته به مقدار ذوب برف در سری زمانی متغیر است. تغییرات آب‌وهوایی به‌طور قابل توجهی بر روند انباشتگی و تخلیه برف تأثیر می‌گذارد (Yang et al., 2003).

پوشش برف تأثیرات مهمی بر آب‌وهوا دارد که آشکارترین اثر آن را می‌توان آلبیدو بالا دانست (Brutel-Vuilmet et al., 2013). مطالعات بسیاری تأثیر مستقیم پوشش برف بر تروپوسفر پایینی را اثبات کرده‌اند (Vavrus, 2007) همچنین اثرات برف بر جو بالا نیز اثبات شده است (Alexander et al., 2010). این امر موجب تقویت بازخورد شاخته شده برف – آلبیدو است که به‌عنوان یکی از دلایل اصلی تقویت سیستم قطبی و تغییرات جوی آن است (Fletcher et al., 2012). این بازخورد در مدل‌های CMIP3 نشان داده شد (D´ery and Brown, 2007). همچنین با توجه به هدایت حرارتی کم برف نقش قابل توجهی را در درجه حرارت خاک و محیط‌های یخ بسته دارد (Gouttevin et al., 2012).

تجزیه‌وتحلیل‌های هفتگی داده‌های NOAA شواهد زیادی را در خصوص کاهش شدید پوشش برف بخصوص در دوره گرم سال در عرض‌های بالای کره زمین را اثبات کرده است (Brown et al.,2010).

پژوهشگران بسیاری ازجمله Lindsay et al., (2009) کاهش عمق و پوشش برفی را در ارتباط با افزایش گرم شدن کره زمین و عقب‌نشینی یخ دریا مرتبط دانستند.

در مقیاس جهانی، تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده توسط اداره ملی اقیانوس‌شناسی و جوی (NOAA) از اوایل دهه ۱۹۷۰ (Robinson, 1993) منبع اصلی مطالعه برای تغییرپذیری برف بوده است (Frei and Robinson, 1992) این اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای تأیید کرده‌اند که سطح متوسط بارش برف در نیمکره شمالی در ۳۰ سال گذشته به خصوص در فصل بهار و تابستان حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است (Serreze et al., 2000). این روند با اندازه گیری مستقیم عمق برف در سطح زمین که در غرب آمریکای شمالی انجام شده است در توافق است (Mote et al., 2005). علاوه بر این، مطالعات بسیاری نیز در ارتفاعات عرض‌های متوسط و پایین انجام شده است که کاهش عمق برف را تأیید کرده‌اند (Laternser and Schneebeli, 2003). این کاهش به‌طور عمده به دلیل افزایش دمای متوسط کره زمین بوده است (Hantel and Hirtl-Wielke, 2007).

همانطور که گفته شد برف یک متغیر هیدرولوژیکی مهم است و به‌عنوان منبع آب در بسیاری از مناطق جهان بخصوص ایران ایفای نقش می‌کند. در ایران مناطق کوهستانی به‌عنوان تأمین کننده آب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک اطراف آن عمل می‌کنند و همزمانی این شرایط یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد قنات در کشور بوده است. برف تغییر پذیری زیادی را نشان می‌دهد که به دلیل تعاملات پیچیده بین موانع کوهستانی و گردش جوی است (رضیئی و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین هر گونه تغییر در پوشش و مقدار برف ممکن است اثرات هیدرولوژیکی و زیست محیطی مهمی داشته باشد، زیرا همان‌طور که پیش‌تر بحث شد برف نقش اساسی در استراتژی‌های مدیریت کشاورزی و آب در ایران دارد. از این رو، درک دقیق تغییرات بلند مدت در میزان برف در پهنه‌های شمالی ایران که کانون اصلی تأمین آب برای کلان شهرهای مهمی همچون تهران، کرج، تبریز و مشهد می‌باشد از اهمیت شایان توجهی برخوردار است.

پژوهش‌های زیادی در سطح جهانی به مطالعه روند عمق برف و پارامترهای مرتبط با آن پرداخته‌اند اما در ایران کمتر پژوهشی به مطالعه عمق برف و روند تغییرات آن پرداخته است؛ بااین‌حال در ادامه به برخی از این پژوهش پرداخته خواهد شد.

Brown (2000) تغییرات پوشش برف در نیمکره شمالی را طی دوره ۱۹۱۵ تا ۱۹۹۷ مورد ارزیابی قرار داد نتایج پژوهش وی نشان داده است که بارش برف در آمریکای شمالی در فصل بهار با کاهش سریع همراه است همچنین در ماه مارس نیز بزرگ‌ترین گرایش کتهی در مقدار پوشش برف دیده شد. تغییرات پوشش برف در مناطق کوهستانی کشور بلغارستان طی دوره ۱۹۳۱ تا ۲۰۰۰ میلادی پژوهشی است که Petkova et al., (2004) به مطالعه آن پرداختند نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است که در برخی از ایستگاه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای را در پوشش برف

دیده می‌شود، در حالی که برخی ایستگاه‌های غالب آنها در مناطق کوهستانی قرار دارند افزایش قابل توجهی در پوشش برف وجود دارد. Grippa et al., (2005) تأثیر عمق برف و آب ناشی از ذوب برف را بر تغییرات پوشش گیاهی در سیبری مرکزی را با استفاده از داده‌های NOAA-AVHRR مورد بررسی قرار دادند نتایج پژوهش آنها نشان داده است که همبستگی معنی‌داری بین پارامترهای برف و NDVI وجود دارد. Dyer & Mote, (2006) با مطالعه تغییرات فضایی و روند عمق برف مشاهداتی را در شمال آمریکا به این نتیجه رسیدند که حداقل تغییر در عمق برف آمریکای شمالی از ژانویه آغاز و این کاهش منطقه‌ای در ماه‌های مارس و آوریل با شدت بیشتری ادامه پیدا می‌کند. Webster et al., (2013) در پژوهشی به مطالعه تغییرات دهه‌ای عمق برف و یخ دریا در قطب شمال پرداختند. نامبردگان در این پژوهش از داده‌های رادار هوابرد طی دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است که از عمق برف در غرب قطب شمال ۳۷/٦۲ درصد کاسته شده است. همچنین ٥٦/٦۳ درصد از یخ دریا در مناطق بوفورت و چوکچی کاسته شد. Xu et al., (2017) تغییرات زمانی–مکانی پوشش و عمق برف را در فلات Qinghai–Tibetan با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۱۰۳ ایستگاه هواشناسی طی دوره ۱۹٦۱ تا ۲۰۱۰ میلادی مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها روند کاهشی در فصول تابستان و پاییز در اکثر ایستگاه‌ها گزارش کردند و نویسندگان این مقدار کاهشی را همگام تغییرات آب‌وهوایی دانسته‌اند. الگوی فضایی و تغییرات سالانه عمق برف در چین طی دوره آماری ۱۹٦۰ تا ۲۰۱٤ پژوهشی است که Zhang & Wang (2018) بدان پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنان نشان داده است که عمق برف در چین روند نزولی داشته است این امر به ویژه پس از ۲۰۰۰ در منطقه لس پلاتو و فلات شرقی تبت با شدت بیشتری ادامه داشته است. Nicolet et al., (2018) به ارزیابی تغییرات آب‌وهوایی و وابستگی فضایی آن بر عمق برف در کوه‌های آلپ فرانسه با استفاده از ۸۲ ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۷۰–۲۰۱۲ پرداختند؛ یافته‌های آنها نشان از کاهش شدید عمق برف در فصل زمستان در نتیجه افزایش دما بوده است. همچنین نتایج آنان نشان داد که وابستگی فضایی عمق برف‌های شدید به دلیل تغییرات آب‌وهوایی مشابه بارش‌های فرین است.

در ایران نیز رضائی و همکاران (۱۳۸۹) روند بارش برف در جلگه مرکزی گیلان و پیامدهای ناشی از آن را با استفاده داده‌های ٥۰ ساله ایستگاه‌های رشت و انزلی مطالعه کردند نتایج حاصل از آزمون من–کندال، بیانگر روند مثبت و افزایشی در ایستگاه رشت و روند منفی و کاهش برف در سایر ایستگاه‌ها بوده است. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای NOAA برای تعیین روند تغییرات سطح پوشش برف شمال‌غرب‌ایران پژوهشی است که فتاحی و همکاران (۱۳۹۲) برای دوره آماری ۲۰۰۸–۱۹۸۸ به مطالعه آن پرداختند نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است که روند معنی‌داری برای سطح پوشش برف در منطقه دیده نمی‌شود. میرموسوی و صبور (۱۳۹۳) به ارزیابی تغییرات پوشش برف با استفاده تصاویر سنجنده MODIS در منطقه شمال غرب ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ماه آوریل

بیش‌ترین تغییرات کاهشی برف را در منطقه شمال غـرب ایـران داشـته اسـت. عزیـزی مقـدم (۱۳۹٤)رونـد تغییـرات پوشش سطح برف با استفاده از تکنیک RS و GIS و تأثیر آن بر منابع آب حوضه دز را مطالعه کرده اسـت نتـایج وی حاکی از کاهش سطح برف در طی دوره آماری ناشی از کاهش بارش در سطح حوضه بوده و اگرچه افـزایش دمـا در حوضه می‌تواند سبب کاهش سطح برف شود اما در این ارزیابی برای سال‌های مورد نظـر در پـژوهش نـامبرده بـه بـا توجه به یافته‌های محقق این پارامتر چندان تأثیرگـذار نبـوده اسـت. تحلیـل رونـد تغییـرات بـارش بـرف و بـاران در ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان غربی پژوهشی است که حیدری (۱۳۹۵) به مطالعه آن طی فصل سرد بـا اسـتفاده از ۷ ایستگاه سینوپتیک با دوره زمانی ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۲ با استفاده از روش‌های من-کندالو شـیب سـنس و آزمـون جمـع تجمعی پرداخته است. نتایج نشان داد کـه در ایسـتگاه‌های جنـوبی اسـتان رونـد صـعودی درصـد بـارش بـرف و در ایستگاه‌های شمالی روند کلی نزول بارش از سال ۲۰۰۰ به وقوع پیوسـته اسـت. ضـمن آن‌کـه در اکثریـت ایسـتگاه‌ها روند نزولی بارش برف از سال ۱۹۹٤ شروع شده اسـت. کیخسـروی کیـانی و مسـعودیان (۱۳۹۵)بـه واکـاوی رونـد تغییرات روزهای برف پوشان در ایران بر پایه داده های سنجنده MODIS پرداختند و بـه ایـن نتیجـه رسـیدند کـه در ماه‌های مهر، آبان و دی روزهای برف پوشان روندی افزایشی دارد. بررسـی رونـد تغییـرات پوشـش بـرف شـمالغرب ایران تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پژوهشی است که فتاحی و مقیمـی (۱۳۹۸) بـه ارزیـابی آن پرداختنـد. نتـایج تحقیـق حاضر نشان داد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه بیشترین مساحت تحت پوشـش بـرف در مـاه‌هـای دسـامبر، ژانویـه، فوریه تا مارس در سطح منطقه مشاهده می‌شود و حداکثر سطح پوشیده شده از برف در ژانویه رخ داده است. بررسـی روند تغییرات سطح پوشش برف در استان آذربایجان غربی در ماه ژانویه به شدت کـاهش یافتـه و دارای رونـد منفـی است و وضعیت مشابهی برای استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل در این ماه رقم خورده است.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان داده است که به رغم داده‌های روزآمـد و قابـل اطیمنـان از عمـق بـرف در سـطح جهانی اما کمتر پژوهشی در ایران در مقیاس منطقه‌ایی با استفاده از این داده‌ها به مطالعه پـارامتر مهمـی همچـون عمـق برف پرداخته است. این پژوهش با استفاده از داده‌های پایگـاه ECMWF نسـخه ERAInterim بـه ارزیـابی رونـد و شیب روند عمق برف (SD) در پهنه شمالی ایران پرداختـه اسـت. دسـتاوردهای ایـن تحقیـق مـی‌توانـد در مطالعـات مربوط به تغییرات آب‌وهوایی، منابع آب، سیل خیزی و کشاورزی مفید باشد.

۲- روش تحقیق

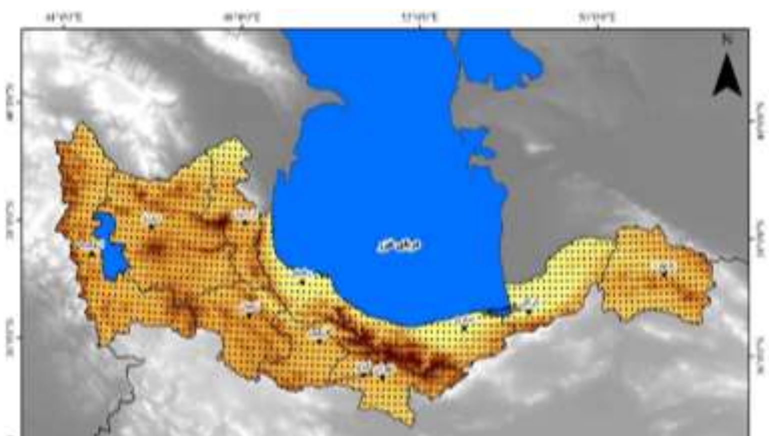
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش پهنه شمالی ایران شمال یازده اسـتان خراسـان شـمالی، گلسـتان، مازنـدران، گیلـان، تهـران، البـرز، قزوین، زنجان، اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی مورد مطالعه قرار گفته است (شـکل ۱). دو دلیـل بـرای انتخـاب ایـن محدوده وجود دارد: ۱- برخوردار بودن این پهنه از ایـران از بارش‌هـای سـالانه بـرف و ۲- وجـود سـطوح مختلـف

ارتفاعی در این پهنه و گسترش طولی و عرضی مناسب آن جهت بررسی تأثیر تمام عوامل همدیدی و زمینی است که بدینوسیله، امکان تبیین این رخداد در هر مکانی با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی مختلف فراهم شود و در نهایت یک الگوی کلی برای این رخداد در منطقه ارائه گردد.

ب) پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپا (ECMWF) نسخه ERA-Interim

ERA-Interim توسط مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپا (ECMWF) تولید شد. داده‌های این پایگاه به شکل ساعتی (۰۰، ۰٦، ۱۲، ۱۸ بر حسب گرینویچ) از سال ۱۹۷۹ در دسترس می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در این پژوهش از تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی (از نظر مکانی بهترین تفکیک ارائه شده از سوی پایگاه ECMWF) برای دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱٦ میلادی به شکل روزانه استفاده گردید. سپس داده‌ها وارد محیط *Matlab*، شدند و ماتریسی به ابعاد ۱۵٦۹×۷ ایجاد شد. در این ماتریس ۷ نماینده ماه‌های مورد مطالعه (ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، اکتبر، نوامبر و دسامبر) و ۱۵٦۹ نیز تعداد یاخته‌های با تفکیک نامبرده می‌باشند. برای صحت سنجی داده‌های عمق برف پایگاه ECMWF از فرآورده برف سنجنده MODIS ماهواره Terra طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱٦ استفاده شد سپس با استفاده ازروش‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) مقدار عمق برف محاسبه گردید. در مجموع مقدار ضریب تعیین ۰/۸۹ و مقدار ریشه متوسط مربع خطا ۱/۳٦۵ به دست آمد که بر این اساس می‌توان اذعان داشت که پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim از عملکرد بالایی برای ارزیابی عمق برف برخوردار است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و یاخته‌های پایگاه (ECMWF) نسخه ERA-Interim با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی

الگوریتم عمق برف در که در حال حاضر در پایگاه ECMWF فعال است نسخه تغییر یافته سال ۲۰۰۱ است. این داده‌ها از تجزیه‌وتحلیل 2D(دو بعدی) و با گام زمانی ٦ ساعته با استفاده روش اصلاح متوالی تولید شده‌اند. زمینه نخست در این مجموعه داده برای عمق برف است که با یکا متر می‌باشد ((Sb[1] (m)) همچنین این پایگاه چگالی برف را هم بر حسب (kg m−3) نیز ارائه می‌دهد. تجزیه‌وتحلیل عمق برف با استفاده از روش درون یابی فضایی کریسمن[2] انجام می‌شود (Daley, 1991) که در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$S^a = S^b + \frac{\sum_{n=1}^{N} w_n\left(S_n^o - S^{\acute{b}}\right)}{\sum_{n-1}^{N} w_n}(m), \quad (۱)$$

در این رابطه S^o عمق برف مشاهداتی از ایستگاه‌های همدید سطحی گزارش شده است، و $S^{\acute{b}}$ پارامتر پس زمینه ایی (داده پایه) برای نقاط مشاهداتی است. همچنین w_n تابع وزنی است. علاوه بر کنترل کیفی اولیه پایگاه داده مشاهداتی پس از تجزیه‌وتحلیل‌های درون یابی کریسمن یک بررسی نهایی نیز برای عمق برف انجام خواهد شد که برخی از مهم‌ترین شروط آن به این شرح هستند: ۱- اگر دمای ۲ متری کمتر از ۸ درجه سانتی گراد باشد، تنها مشاهدات عمق برف کمتر از ۱٤۰ سانتی امکان پذیر است؛ ۲- اگر دمای هوا ۲ متری بیش از ۸ درجه سانتی گراد باشد این آستانه به ۷۰ سانتی متر کاهش می‌یابد؛ ۳- تجزیه‌وتحلیل عمق برف محدود به ۱٤۰ سانتی متر است؛ ٤- اگر داده‌های مدل‌سازی شده با مشاهداتی اختلاف ۵۰ سانتی متری داشته باشند آنگاه این داده بازنگری اساسی خواهد شد. ۵- هنگامی که تنها یک پیکسل با در نظر گرفتن شعاع حداکثر (r_{max}) عمق برف را گزارش دهد عمق برف به‌طور خودکار صفر تنظیم می‌شود؛ ٦- اگر عمق برف کمتر از ۰/۰٤ سانتی متر به دست آید آنگاه عمق برف صفر در نظر گرفته خواهد شد؛ ۷- اگر عمق برف مشاهداتی در نیمی از مشاهدات با در نظر گرفتن شعاع حداکثر (r_{max}) وجود نداشته باشد عمق برف مجدد صفر در در نظر گرفته می‌شود (Drusch et al., 2004).

۲-۳- روش‌های آماری

۲-۳-۱- آزمون ناپارامتریک روند Mann-Kendall

آزمون ناپارامتریک Mann-Kendall (Mann, 1945; kendall, 1975) بر اساس مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی در طیف گسترده‌ایی از گرایش علوم محیطی و آب‌وهوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در این آزمون H_0: بیانگر توزیع تصادفی داده هستند (فاقد روند هستند) و H_1 مبین روند داده‌ها است.

1 snow depth
2 Cressman

اگر $x_1, x_2, \ldots, x_n$ مشاهدات مورد نظر در یک سری زمانی باشد، بر این اساس آزمون من-کندال بر این اساس قابل تشریح است.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (۲)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & if \quad (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & if \quad (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & if \quad (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

در این آزمون آماری هر داده با تمامی داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود. در این مرحله می‌توان بجای استفاده از مقادیر اصلی داده‌ها، از مرتبه داده‌ها در سری زمانی استفاده کرده و مرتبه‌ها را به همین روش مقایسه نمود. لذا بر اساس آنچه گفته شد این آزمون یک آزمون مبتنی بر مرتبه داده‌ها می‌باشد. با فرض اینکه داده‌ها مستقل بوده و توزیع یکنواخت دارند، میانگین وردایی S ازمعادلات ٤ و ٥ محاسبه می‌شود:

$$E(S) = 0 \quad (٤)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (٥)$$

در معادلات ٤ و ٥؛ n: تعداد داده‌ها، m: تعداد گره‌ها و t: تعداد داده در هر گره می‌باشد. منظور از گره این است که در سری داده‌ها، اگر یک مقدار داده تکرار شده باشد، این مقادیر مساوی، تشکیل یک گره را می‌دهند و تعداد این مقادیر مساوی در گره m ام برابر t می‌باشد. آماره این آزمون (Z) دارای توزیع نرمال بوده و از معادله ٦ به دست می‌آید.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & if \quad S > 0 \\ 0 & if \quad S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & if \quad S < 0 \end{cases} \quad (٦)$$

همانطور که معادلات نیز مشخص است این روش یک آزمون دو طرفه است. بنابراین در صورتی‌که $|Z| \le Z_{\alpha/2}$ باشد، در سطح اطمینان α فرض صفر پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت، فرض صفر رد خواهد شد. در حالت رد فرض صفر (وجود روند)، در صورتی که $S>0$ باشد، سری زمانی دارای روند مثبت (صعودی) و در صورتی که $S<0$ باشد، سری زمانی دارای روند منفی (نزولی) خواهد بود.

۲-۳-۲- آزمون ناپارامتریک شیب روند Sen's Slope

جهت برآورد شیب روند در سری زمانی عمق برفاز روش ناپارامتریک سنس[1] (Sen's, 1968) استفاده‌شد. این روش روند در سری زمانی زمانی کابرد دارد که سری زمانی دارای یک‌روند خطی باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). بر این اساس روش سنس به صورت معادله (۲) نوشته می‌شود.

$$f(t) = Qt + B \qquad (۷)$$

در معادله ۷، Q، شیب‌خط روند و B، مقدار ثابت است. جهت محاسبه شیب‌خط روند یعنی Q، ابتدا شیب بین هر جفت سری داده‌های مشاهداتی، با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \qquad (۸)$$

در معادله فوق $j > k$ است. در این معادله x_j و x_k به ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان‌های j و k است.

۳- نتایج و بحث

ارزیابی روند عمق برف پهنه شمالی ایران در ماه ژانویه نشان می‌دهد (شکل ۲-الف) که تنها درصد ناچیز ۰/۰۶۳ درصد از پهنه شمالی کشور روند افزایشی معنی‌دار در سطح $\alpha = 0.1$ دارند این مناطق بیشتر در شمال غربی ایران در مرز با کشور ترکیه قرار دارند، مناطقی با فاقد روند معنی‌دار افزایشی ۳/۸۲ درصد از کل پهنه شمالی کشور را در این ماه از سال در برگفته اند. این مناطق نیز در استان خراسان شمالی و در حوالی بجنورد قرار دارند. مناطقی با روند افزایشی در سطوح آماری ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ در پهنه شمالی کشور را مشاهده نشده‌اند. مناطقی با فاقد روند معنی‌دار کاهشی ۱٤/٤٦ درصد از کل پهنه شمالی کشور را اشغال کرده‌اند که بیشترین سهم از پهنه‌های فاقد روند معنی‌دار در پهنه شمالی کشور را دارا می‌باشند. بیشینه درصد روند کاهشی معنی‌دار در پهنه شمالی ایران با ٤۷/۹۹ درصد مربوط به سطح احتمال ۰/۰۰۱ می‌باشد که شهرهای تهران، کرج، قزوین، زنجان و تبریز را شامل می‌شود. پس از آن مناطقی با روند کاهشی ۹۹٪ با ۲۰/۲۲ درصد و سطح احتمالاتی ۰/۹۵ با ۱۰/۵۱ درصد و در نهایت مناطق با روند کاهشی معنی‌دار ۰/۹۰ درصد با ۲/۹۳ درصد پهنه شمالی کشور را در بر گرفته‌اند. در مجموع در ماه ژانویه از فصل زمستان در بیش از ۹٦ درصد از پهنه شمالی ایران مقدار عمق برف روند کاهشی را نشان داده است (جدول ۱). مناطق شمال غربی ایران در مرز بین ایران و ترکیه که روند افزایشی عمق برف را نشان داده‌اند. ژانویه کمترین مقدار آزمون من-کندال را در فصل زمستان نشان داده است (جدول ۲). در این ماه از فصل زمستان بیشینه روند کاهشی ۵/۵۸- و متوسط روند نیز ۳/۱٤- محاسبه شد. همچنین متوسط شیب روند محاسبه شده ژانویه ۰/۰۳۳ به دست آمده است. این مقدار نشان می‌دهد عمق برف با شیب منفی ۰/۰۷ سانتی متر در حال کاهش است.

---
1 Sen's Slope Estimator

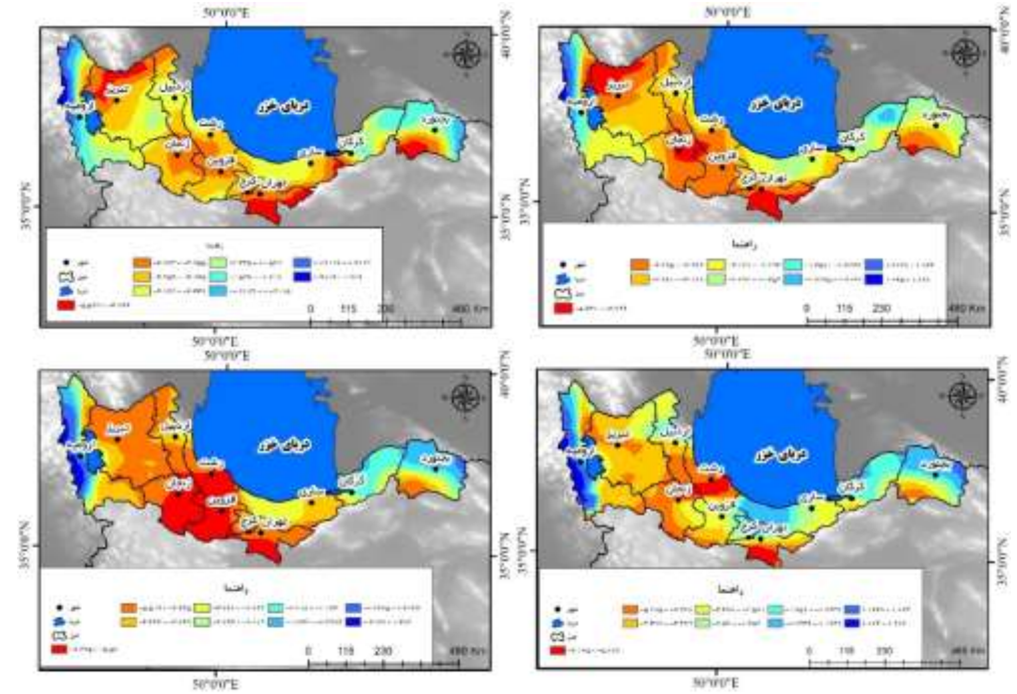
جدول ۱- درصد مساحت روند عمق برف در پهنه شمالی ایران مبتنی بر پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim

ماه	فاقد روند معنی‌دار افزایشی	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۱	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱	فاقد روند معنی‌دار کاهشی	روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۱	روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵	روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱	روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱
ژانویه	۳/۸۲	۰/۰۶۳	–	–	–	۱۴/۴۶	۲/۹۳	۱۰/۵۱	۲۰/۲۲	۴۷/۹۹
فوریه	۲/۸۰	۰/۰۶۳	–	–	–	۹/۶۸	۴/۰۴	۱۰/۳۲	۱۷/۰۱	۵۶/۰۸
مارس	۴/۰۱	–	–	–	–	۱۳/۶۳	۲/۲۹	۲/۹۳	۵/۳۲	۷۱/۸۲
آوریل	۱۰/۰۷	–	–	–	–	۵۱/۶۸	۲/۸۶	۴/۶۵	۱۱/۳۷	۱۹/۳۷
اکتبر	۲۷/۱۴	۱/۱۱	۳/۳۵	۲/۸۹		۵۳/۱۴	۳/۳۸	۶/۷۶	۲/۲۳	-
نوامبر	۲۶/۸۳	۱/۵۲	۴/۱۴	۳/۳۷	۰	۵۵	۴/۹۰	۳/۸۲	۰/۴۲	–
دسامبر	۴/۹۷	۰/۰۶۳	-	-	-	۲۸/۸۰	۹/۵۶	۱۷/۸۴	۲۳/۰۲	۱۵/۷۴

همانند ماه ژانویه دو ماه فوریه (۲-ب) و مارس (۲-ج) از فصل زمستان از روند شدیدتر کاهشی عمق برف برخوردار هستند به طوری که پهنه شمالی ایران در این دو ماه از سال عمق برف دارای روند کاهشی شدید است (جدول ۱). بیشینه روند معنی‌دار کاهشی عمق برف در ماه مارس است. در این ماه ۵۶/۰۸ درصد از پهنه شمالی کشور روند کاهشی در سطح ۰/۰۰۱ را تجربه کرده‌اند که در فصل زمستان پس از مارس بیشینه روند کاهشی معنی‌دار را به خود اختصاص داده است. مهم‌ترین شهرهایی که در این پهنه قرارگرفته‌اند می‌توان به تهران و زنجان اشاره کرد. ماه مارس وسعت پهنه‌هایی با همین روند معنادار افزایشی (۰/۰۰۱) رشد قابل‌توجهی یافته‌اند و از همه ماه‌های دیگر بیشتر بوده‌اند و به ۷۱/۸۲ درصد رسیده است. مناطقی با روند کاهشی ۰/۹۹ در ماه فوریه ۱۷/۰۱ و در ماه مارس ۵/۳۲ درصد به‌دست‌آمده است. روند کاهشی در سطح ۰/۹۵ نیز در ماه فوریه ۱۰/۳۲ و مارس ۲/۹۳ درصد محاسبه شد. مناطق شمال شرقی، شمال غرب و غرب پهنه شمالی ایران در ماه فوریه و مارس به رقم مقدار افزایشی ولی معنی‌داری در روند را نشان نداده‌اند.

در ماه فوریه روند کاهشی شدت بیشتری نسبت به ماه ژانویه پیدا کرده است و این شدت کاهشی در مارس نیز بیشتر شده است به طوری که زنجان در ماه ژانویه در کلاس (۴/۷۶- تا ۹۵-۳-) قرار داشته در ماه فوریه این شهر در کلاس (۵/۶۳- تا ۴/۷۹-) و مارس در کلاس (۶/۳۹- تا ۵/۵۲-) قرار گرفته است. شدیدترین روند کاهشی را تهران و

زنجان در ماه فوریه و قزوین، زنجان و رشت در ماه مـارس تجربـه کردهانـد. پـس از آن منطقـه شـمال غـرب رونـد کاهشی شدیدی تجربه کرده است. مناطقی با روند افزایشی بیشینه عمق برف در منطقه مرزی ایران بـا ترکیـه و منطقـه شمال شرق ایران در مرز با کشور ترکمنستان قرار گرفته است.



شکل ۲- روند عمق برف ماهانه در پهنه شمالی ایران مبتنی بر پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim؛ الف) ماه ژانویه؛ ب) ماه فوریه؛ ج) ماه مارس و د) ماه آوریل

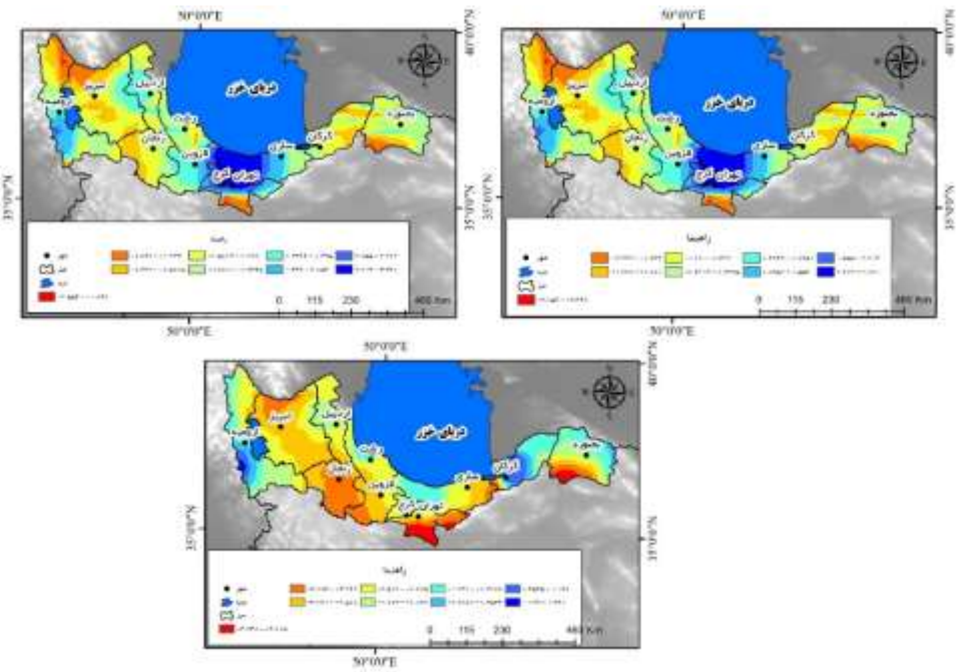
همانطور که در جدول (۲) نیز آمده است مقدار بیشینه کاهشی رونـد در فوریـه ۵/۶۳- و مـارس ۶/۳۹- محاسـبه شد. مقدار متوسط شیب روند نیز ۰/۰۵۴- و ۰/۰۲۷- سانتی‌متر در سری زمانی مورد مطالعه محاسـبه شـد کـه نشـان دهنده مقدار کاهشی عمق برف در پهنه شمالی کشور می‌باشد. مقدار متوسط روند کاهشـی در مـاه فوریـه ۳/۳۸- و در ماه مارس ۴/۱۴- و مقدار روند افزایشی بیشینه ۱/۸۸ و مقدار متوسط آن نیز ۰/۶۲ محاسبه شد. به رقـم افزایشـی بـودن مقدار روند اما این مقدار روند در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد.

روند کاهشی شدید عمق برف می‌تواند همانطور که در سال‌های جاری کشور را با کاهشی آب مواجه کـرده اسـت می‌تواند در سال‌های آتی بر این مشکل اساسی بی افزاید. شدت یـافتن رونـد کاهشـی عمـق بـرف آن‌هـم در منـاطق آب‌وهوایی سرد می‌تواند به تهدید جدی برای مخازن آب پهنـه شـمالی کشـور باشـد بـه‌عبارت‌دیگر می‌تـوان اذعـان داشت که مرز مناطق آب‌وهوایی در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات جدی شده‌اند و آب‌وهوای پهنـه شـمالی ایـران

در حال گرم‌تر شدن است. این امر پیش‌تر توسط مسعودیان (۱۳۸۳) نیز تأیید شده است. براتی و موسوی (۱۳۸٤) که موج‌های گرم زمستان را در ایران را مطالعه کردند به نتیجه ایی مشابه با پژوهش حاضر دست‌یافته‌اند محققین نامبرده به این نتیجه رسیدند که شدت روند افزایشی عمق برف در ایستگاه‌های مناطق کوهستانی و برف‌گیر شمال غرب، شمال و تا حدودی غرب از مناطق جنوب ایران بیشتر است. همان‌طور که در نقشه‌های هم‌روند مربوط به فصل زمستان پیداست مناطق مرکزی و شمال غربی پهنه شمالی ایران روند کاهشی بیشتری را تجربه کرده‌اند این امر برای کلان شهرهای تهران، کرج و تبریز می‌توان یک تهدید اساسی به شمار آورد.

در ماه آوریل ۱۰/۰۷ درصد از کل پهنه شمالی کشور دارای فاقد روند معنی‌دار افزایشی می‌باشند (جدول ۱). روند کاهشی در سطح ۰/۰۰۱ برای ماه آوریل نسبت به فصل زمستان کاهش زیادی را نشان داده است به طوری که این مقدار به ۱۹/۳۷ درصد رسیده است. وسعت مناطقی با روند افزایشی در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ در ماه آوریل بتریب ۱۱/۳۷ و ٤/٦٥ درصدی را نشان داده‌اند. برعکس ماه‌های فصل زمستان مناطق با فاقد روند معنی‌دار کاهشی در فصل زمستان افزایش قابل توجهی را نشان داده‌اند. به طوری که در این ماه از سال ٥۱/٦۸ درصد از پهنه‌های نوار شمالی ایران فاقد روند معنی‌دار کاهشی بوده‌اند.

در آوریل نیز الگوی هم روند عمق برف از همان الگوی زمستانه پیروی می‌کند. روند افزایشی نوار غربی ایران در مرز ترکیه که روند افزیشی را نشان داده است در سطح $\alpha = 0.05$ معنی‌دار می‌باشد. در این ماه منطقه البرز مرکزی نیز عمق برف روند افزایشی را نشان داده است که این مقدار افزایشی از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده از مقدار روند و شیب روند در جدول (۲) بیشینه روند کاهشی ٥/۳٤- در مقیاس روش ناپارامتریک من- کندل به دست آمده درست در نقطه مقابل بیشینه روند افزایشی برای این ماه ۱/٥۲ محاسبه شد. بیشینه روند کاهشی در شمال زنجان و بیشینه روند افزایشی در مرز ایران و ترکیه محاسبه شد. متوسط روند کاهشی در ماه آوریل ۲/۷۳- و مقدار متوسط روند افزایشی ۰/٥۲ محاسبه شد. مقدار روند کاهشی در سطح ۹۹ درصد معنادار می‌باشد اما مقدار افزایشی در هیچ یک از سطوح آماری معنی‌دار نمی‌باشد. مقدار متوسط شیب روند عمق برف در این ماه ۰/۰۰۱- محاسبه و کمینه شیب روند ۰/۰۰٤- به دست آمده است. به رقم کاهشی بودن مقدار کمینه و متوسط شیب روند اما مقدار بیشینه همانند ماه‌های پیشین مثبت شده است که این مقدار شیب روند در شمال غرب و شمال شرق است.



شکل ۳- روند عمق برف ماهانه در پهنه شمالی ایران مبتنی بر پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim؛ الف) ماه اکتبر؛ ب) ماه نوامبر؛ ج) ماه دسامبر

با آغاز فصل پاییز الگوهای روند عمق برف پهنه شمالی کشور نیز تغییرات زیادی را به نسبت فصل زمستان و ماه آوریل از فصل بهار داشته است؛ روند عمق برف در ماه اکتبر (۳-الف) الگوی جدیدی را نشان داده. این ماه هر چند همانند ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس روند کاهشی عمق برف بیشینه است؛ اما مناطقی با روند افزایشی در مجموع ۳٤/٤۹ درصد از پهنه‌های هم‌روند پهنه شمالی کشور را در بر گرفته‌اند. مناطقی با روند معنادار افزایشی در سطح ۰/۰۱، ۲/۸۹ درصد و در سطوح ۰۵/ و ۰/۱ به ترتیب ۳/۳۵ و ۱/۱۱ درصد از کل پهنه شمالی کشور را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مناطقی با فاقد روند معنی‌دار افزایشی که در شمال غرب در مرز با کشور ترکیه، در شمال استان خراسان شمالی و شمال تهران و البرز و جنوب استان مازندان قرار گرفته‌اند ۲۷/۱٤ درصد از مساحت مناطق پهنه شمالی ایران را در بر گرفته‌اند. بر خلاف ماه‌های فصل زمستان و ماه آوریل که کانون اصلی روند افزایشی عمق برف در شمال غرب کشور بوده است در این ماه اکتبر به همراه نوامبر این مقدار در بخش‌های میانی رشته کوه البرز به دست آمده است همچنین مناطق میانی و غرب استان مازندران که عمق برف روند مثبتی را نشان داده است دور انتظار نمی‌باشد چرا که در سال‌های اخیر شاهد بارش شدید برف در این منطقه از کشور می‌باشیم به طوری که در بهمن ۱۳۹۲ برفی با ارتفاع ۱۷۰ سانتی متر در تنکابن در غرب استان مازندران ثبت شده است همچنین برف‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸٦ نیز در غرب استان مازندران قابل توجه بوده است. بیشینه روند کاهشی عمق برف در شمال غرب

ایران، جنوب استان تهران و خراسان شمالی محاسبه شد. متوسط روند کاهشی در ماه اکتبر ۰/۹٦- و متوسط روند افزایشی ۱/۱٤ به دست آمده است که در هیچ یک از مقادیر افزایشی و کاهشی نامبرده این مقدار معنا دار نمی‌باشد.

ماه نوامبر (۳-ب) همانند اکتبر که غالب روند عمق برف پهنه شمالی کشور کاهشی است الگویی مشابه از پهنه‌های هم‌روند ارائه داده است؛ به طوری که در این ماه از سال ۳۵/۸٦ درصد از پهنه شمالی کشور را پهنه‌های با روند افزایشی و ٦٤/۱٤ درصد از پهنه شمالی کشور را مناطقی با روند معنی‌دار کاهشی تشکیل داده است. مناطق با روند کاهشی معنادار در سطوح ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب ۲/۲۳، ٦/۷٦ و ۳/۳۸ درصد از مناطق نامبرده را در بر گرفته‌اند. ماه دسامبر الگوی روند زمستانه را نشان داده است. در ماه دسامبر مناطقی با روند کاهشی بیش از ۹٤ درصد از پهنه شمالی کشور را فرا گرفته‌اند و تنها در در نوار غربی، بخش‌هایی از البرز مرکزی، ارتفاعات استان گلستان و خراسان شمالی عمق برفی روندی افزایشی را نشان داده است که تنها در کمتر از ۱ درصد از کل منطقه مورد مطالعه این روند معنی‌دار آن هم در سطح ۹۰ درصد می‌باشد. بیشینه پهنه‌های هم‌روند مربوط به مناطقی با فاقد روند معنی‌دار کاهشی است که ۲۸/۸۰ از مناطق را در بر می‌گیرد. الگوی پهنه هم روند در ماه نوامبر از همان الگوی ماه اکتبر پیروی می‌کند اما ماه دسامبر یک الگوی روند زمستانه را نشان داده است در این ماه جنوب خراسان شمالی و تهران بیشینه روند کاهشی عمق برف را نشان داده‌اند. متوسط روند کاهشی نوامبر ۰/۸۷- و در ماه دسامبر ۲/۲۱- به دست آمده است که در ماه دسامبر این مقدار متسوط روند در سطح ۹۹ درصد معنادار می‌باشد. مقدار متوسط روند افزایشی در نوامبر ۱/۱٤ و در دسامبر ۰/٦٦ به دست آمده است. نکته جالب توجه در خصوص مقدار روند محاسباتی روند کاهشی و افزایشی نشان داده است که مقدار روند کاهشی از نوامبر به دسامبر افزایش را نشان داده است اما در مقابل برای روند افزایشی مقدار کاهشی را نشان داده است. متوسط شیب روند در نوامبر چندان قابل توجه نمی‌باشد اما این مقدار در دسامبر ۰/۰۱۱- محاسبه شد. اطلاعات کامل مقدار روند و شیب روند در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) مقدار روند (Test Z) و شیب روند (Test Q) عمق برف در پهنه شمالی ایران مبتنی بر پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim

ماه	مقدار روند کاهشی (بیشینه)	مقدار روند کاهشی (متوسط)	مقدار روند کاهشی (کمینه)	مقدار روند افزایشی (بیشینه)	مقدار روند افزایشی (متوسط)	مقدار روند افزایشی (کمینه)	مقدار کمینهٔ شیب روند	مقدار بیشینهٔ شیب روند	مقدار متوسط شیب روند
ژانویه	-۵/۵۸	-۳/۱٤	-۰/۰۱	۱/۷۱	۰/٦۱	۰	-۰.۱۲۲	۰.۰۷۷	-۰.۰۳۳
فوریه	-۵/٦۳	-۳/۳۸	-۰/۰٦	۱/۸۸	۰/۷۰	۰	-۰.۲۵۹	۰.۰۸۱	-۰.۰۵۴
مارس	-٦/۳۹	-٤/۱٤	-۰/۰۱	۱/۵۲	۰/٦۲	۰	-۰.۱۳۶	۰.۰۷۶	-۰.۰۲۷
آوریل	-۵/۳٤	-۲/۷۳	-۰/۰٦	۱/۵۲	۰/۵۲	۰	-۰.۰۰۴	۰.۰۰۲	-۰.۰۰۱
اکتبر	-۲/۸۷	-۰/۹٦	-۰/۰۲	۱/۸۷	۱/۰۳	۰	۴۱۳-۰.۰۰	۱۳۲۰.۰۰	۱-۰.۰۰۰۰
نوامبر	-۳/۱۱	-۰/۸۷	-۰/۰۱	۲/۸۷	۱/۱٤	۰	-۰.۰۰۲۶۴	۰.۰۰۴۳۲	-۰.۰۰۰۰۲
دسامبر	-٤/۷٤	-۲/۲۱	-۰/۰۱	۱/۹٤	۰/٦٦	۰	-۰.۰۴۶۱۳	۰.۰۱۰۸۱	-۰.۰۱۱۷۶

٤- جمع‌بندی

در این پژوهش به ارزیابی بلندمدت روند ماهانه عمق برف (SD) در پهنه شمالی ایرانبر اساس مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی طی دوره زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ میلادی پرداخته شد. روش‌های ناپارامتریک Mann–Kendall و Sen's Slope به ترتیب برای ارزیابی روند و شیب روند عمق برف استفاده شد.

نتایج نشان داده است در فصل زمستان در تمامی ماه‌های مورد مطالعه در پهنه شمالی ایران عمق برف در بیش از ۹٦ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای روند کاهشی می‌باشد. روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱ در ماه‌های فصل زمستان بیشینه روند را به خود اختصاص داده‌اند و هر چه از ژانویه به مارس پیش برویم بر وسعت مناطق تحت قلمرو این سطح معنی‌دارای روند افزوده می‌شود؛ به طوری که در ژانویه ٤۷/۹۹، فوریه ٥٦/۰۸ و در ماه مارس ۷۱/۸۲ درصد از وسعت پهنه شمالی ایران را مناطقی با روند کاهشی در سطح احتمالاتی ۹۹/۹۹ درصد در بر گرفته است. در فصل زمستان مناطق مرزی ایران در شمال غرب و شرق منطقه مورد مطالعه روند افزایشی عمق برف مشاهده شد که این روند به رقم افزایشی بودن اما معنادار نمی‌باشد. بیشینه روند کاهشی عمق برف در استان‌های تهران، قزوین، زنجان و آذربایجان شرقی به دست آمده است. افزایش دمای زمستانه کشور و رژیم دمایی نیز در انبارش برف تاثیرگذار است که پیش‌تر توسط مسعودیان (۱۳۸۳) و براتی و موسوی (۱۳۸٤) نیز مورد تأیید قرار

گرفته است که در تأیید نتایج به دست آمده برای روند عمق برف است. در ماه آوریل از فصل بهار مناطقی با فاقد روند معنی‌دار کاهشی با بیش از ۵۱ درصد از پهنه‌های هم‌روند بیشینه مناطق تحت اشغال روند را به خود اختصاص داده است. الگوی هم روند عمق برف در فصل بهار از همان الگوی زمستانه تبعیت می‌کند. متوسط شیب روند نیز همگام با کاهش روند در ماه آوریل کاسته شده است. به طوری که متوسط آزمون Q که نماینگر شیب روند می‌باشد در ماه آوریل به ۰/۰۰۱- رسیده است. این در حالی است که در ماه ژانویه شیب روند ۰/۰۳۳-، فوریه ۰/۰۵٤- و مارس ۰/۰۲۷- محاسبه شد. همچنین متوسط روند کاهشی فصل زمستان ۳/۵۳- و متوسط روند فصل بهار ۲/۷۳- و متوسط روند فصل پاییز ۱/۳٤- محاسبه شد لذا به روشنی پیداست که فصل زمستان بیشینه تغییرات کاهشی عمق برف را تجربه کرده است که این عامل می‌تواند در ارتباط با پدیده گرمایش جهانی باشد از طرف دیگر این الگوی کاهشی از عمق برف برای فصل زمستان می‌تواند نشان دهنده گرم‌تر شدن زمستان‌های پهنه شمالی ایران باشد و همانطور که براتی و موسوی (۱۳۸٤) نشان دادند موج‌های گرم زمستانه در ایران حال افزایش است که با نتایج ارائه شده در این تحقیق همراستاست. در مقابل متوسط روند افزایشی در فصل زمستان ۰/٦٤، آوریل از فصل بهار ۰/۵۲ و فصل پاییز ۰/۹٤ محاسبه شد. بر عکس روند کاهشی در روند افزایشی در فصل پاییز بر اساس نتایج آماری به دست آمده در سری زمانی مورد مطالعه مقدر ریزش برف در حال افزایش است این افزایش در فصل پاییز برای ماه‌های اکتبر و نوامبر بر خلاف ماه‌های دیگر در مناطق شمال تهران و جنوب استان مازندران بخصوص در منطقه البرز مرکزی شناسایی شد. روند افزایشی برف پیش‌تر توسط کیخسروی کیانی و مسعودیان (۱۳۹۵)که به واکاوی روند تغییرات روزهای برفپوشان در ایران بر پایه داده های سنجنده MODIS پرداختند در ماه‌های مهر، آبان و دی مورد تأیید قرار گرفته است. علت روند افزایشی برای عمق برف نیازمند مطالعات بیشتر است یکی از دلایل مهمی که می-توان برای این روند عنوان کرد پدیده گرمایش جهانی و گرداب‌های قطبی است؛ گرمایش زمین و صعود گرمابه سمت هوا سپهر گرداب‌های قطبی را شکل می‌دهد که باعث چرخش جریان هوا در ارتفاعات بالا می‌شود که درنتیجه آن جریان هوا شدید در اطراف مناطق قطبی ایجاد می‌شود که این چرخش هوا باعث گسیل شدن آب‌وهوای سرد مناطق قطبی به سمت مناطق مرکزی کره زمین می‌شود که شاید یکی از دلایل توجیه کننده روند افزایشی عمق برف باشد. متوسط شیب روند نیز در دو ماه اکتبر و نوامبر بسیار ناچیز است اما در ماه دسامبر مقدار شیب روند به ۰/۰۱۱- رسیده است. همچنین ماه دسامبر الگوی روند مشابه با فصل زمستان دارد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی عمق برف با استفاده از روش‌های مختلف عددی و ماهواره‌ایی مورد مطالعه قرار گیرد تا بهتر بتوان نسبت به تغییرات منطقه‌ای این پدیده مهم آب‌وهوایی به بحث و بررسی پرداخت. همچنین مطالعه الگوهای موجد افزایش و کاهش برف در مقیاس کلان نیز می‌تواند راهگشای مسائل بسیاری در جهت شناخت، پیش بینی و در نهایت برنامه ریزی بهتر در راستای مدیریت منابع آب و حوضه آبخیز باشد.

کتابنامه

احمدی، محمود؛ چترچی، پرسیا؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ۱۳۹۷. مدل‌سازی روند بارش در منطقه غرب آسیا تحت واداشت دگرگونی آب‌وهوایی. *پژوهش‌های دانش زمین*. سال ۹. شماره ۳۵. صص ٦٨-۸۰.

احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ احمدی، حمزه؛ علی‌بخشی، زهرا؛ ۱۳۹۷. واکاوی ساختار دمای ایران مبتنی بر برون‌داد پایگاه دادهٔ مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخهٔ ERAInterim. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. دوره ۵۰. شماره ۲. صص ۳۵۳-۳۷۲.

براتی، غلامرضا؛ موسوی، شفیع؛ ۱۳۸٤. جابجایی مکانی موج‌های زمستانی گرما در ایران. *مجله جغرافیا و توسعه*. دوره ۳. شماره پیاپی ۵. صص ٤۱-۵۲.

حیدری، حسن؛ ۱۳۹۵. تحلیل روند تغییرات بارش برف و باران در ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان غربی. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. دوره ۷. شماره ۲٦. صص ۱۱۰-۹۲.

رضائی، پروز؛ جانبازی قبادی، غلامرضا؛ جعفرزاده، علیرضا؛ ۱۳۸۹. روند بارش برف در جلگه مرکزی گیلان و پیامدهای ناشی از آن. *مجله مطالعات برنامه ریزی سکونتگاه‌های انسانی*. دوره ۵. شماره ۱۱. صص ٤۷-٦۰.

عزیزی مقدم، رضا؛ *روند تغییرات پوشش سطح برف با استفاده از تکنیک RS و GIS و تأثیر آن بر منابع آب حوضه دز*. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. به راهنمایی جهانگیر عابدی کوپایی و حسن ترابی پوده. اصفهان.

فتاحی، ابراهیم؛ مقیمی، شوکت؛ ۱۳۹۸. بررسی روند تغییرات پوشش برف شمالغرب ایران تحت تأثیر تغییرات اقلیمی. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. دوره ۱۹. شماره ٥٤. صص ٤۷-٦۳.

فتاحی، ابراهیم؛ مقیمی، شوکت؛ خورشیدی، مریم؛ ۱۳۹۲. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای NOAAبرای تعیین روند تغییرات سطح پوشش برف شمال‌غرب ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. دوره ٤. شماره ١٤. صص ۱-۱۰.

کیخسروی کیانی، محمدصادق؛ مسعودیان، ابوالفضل؛ ۱۳۹۵. واکاوی روند تغییرات روزهای برفپوشان در ایران بر پایه داده‌های دور سنجی. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. سال ۲۸. شماره ۱. صص ٦۰-٤۹.

مسعودیان، ابوالفضل؛ ۱۳۸۳. بررسی روند دمای ایران در نیم سده گذشته. *مجله جغرافیا و توسعه*. دوره ۲. شماره پیاپی ۳. صص ۸۹-۱۰٦.

میرموسوی، حسین؛ صبور؛ لیلا؛ ۱۳۹۳. پایش تغییرات پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در منطقه شمال غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*. شماره ۳۵. صص ۱۸۱-۲۰۰.

Alexander, M. A., Tomas, R., Deser, C., & Lawrence, D. M., 2010. The atmospheric response to projected terrestrial snow changes in the late twenty-first century. Journal of Climate, 23(23), 6430-6437.

Brown, R. D., 2000. Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915–97. Journal of climate, 13(13), 2339-2355.

Brown, R., Derksen, C., & Wang, L., 2010. A multi-data set analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent, 1967–2008. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D16).

Brutel-Vuilmet, C., Ménégoz, M., & Krinner, G., 2013. An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. Cryosphere, 7(1).

Daley, R., 1991. Atmospheric data analysis, Cambridge atmospheric and space science series. Cambridge University Press, 6966(25), 809-822.

Déry, S. J., & Brown, R. D., 2007. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback. Geophysical Research Letters, 34(22).

Drusch, M., Vasiljevic, D., & Viterbo, P., 2004. ECMWF's global snow analysis: Assessment and revision based on satellite observations. Journal of Applied Meteorology, 43(9), 1282-1294.

Dyer, J. L., & Mote, T. L., 2006. Spatial variability and trends in observed snow depth over North America. Geophysical Research Letters, 33(16).

Fletcher, C. G., Zhao, H., Kushner, P. J., & Fernandes, R., 2012. Using models and satellite observations to evaluate the strength of snow albedo feedback. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D11).

Frei, A., & Robinson, D. A., 1999. Northern Hemisphere snow extent: Regional variability 1972–1994. International Journal of Climatology, 19(14), 1535-1560.

Gouttevin, I., Menegoz, M., Dominé, F., Krinner, G., Koven, C., Ciais, P., ...& Boike, J., 2012. How the insulating properties of snow affect soil carbon distribution in the continental pan-Arctic area. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 117(G2).

Grippa, M., Kergoat, L., Le Toan, T., Mognard, N. M., Delbart, N., L'hermitte, J., & Vicente-Serrano, S. M., 2005. The impact of snow depth and snowmelt on the vegetation variability over central Siberia. Geophysical Research Letters, 32(21).

Hantel, M., & Hirtl-Wielke, L. M., 2007. Sensitivity of Alpine snow cover to European temperature. International Journal of Climatology, 27(10), 1265-1275.

Karl, T. R., Groisman, P. Y., Knight, R. W., & Heim Jr, R. R. 1993. Recent variations of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations. Journal of Climate, 6(7), 1327-1344.

Kendall, M. 1975). Multivariate analysis. Charles Griffin.

Laternser, M., & Schneebeli, M., 2003. Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). international Journal of climatology, 23(7), 733-750.

Lindsay, R. W., Zhang, J., Schweiger, A., Steele, M., & Stern, H., 2009. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend. Journal of Climate, 22(1), 165-176.

Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 245-259.

Mote, P. W., Hamlet, A. F., Clark, M. P., & Lettenmaier, D. P., 2005. Declining mountain snowpack in western North America. Bulletin of the American meteorological Society, 86(1), 39-50.

Nicolet, G., Eckert, N., Morin, S., & Blanchet, J., 2018. Assessing climate change impact on the spatial dependence of extreme snow depth maxima in the French Alps. Water Resources Research, 54(10), 7820-7840.

Petkova, N., Koleva, E., & Alexandrov, V., 2004. Snow cover variability and change in mountainous regions of Bulgaria, 1931–2000. Meteorologische Zeitschrift, 13(1), 19-23.

Raziei, T., Bordi, I., & Pereira, L. S., 2017. A snow variability analysis in Iran in relation to global warming and climate change.

Robinson DA., 1993. Global snow cover monitoring: an update. Bulletin of the American Meteorological Society 74(9): 1689–1696.

Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379-1389.

Serreze, M. C., Walsh, J. E., Chapin, F. S., Osterkamp, T., Dyurgerov, M., Romanovsky, V., ...& Barry, R. G., 2000. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. Climatic Change, 46(1-2), 159-207.

Vavrus, S. 2007. The role of terrestrial snow cover in the climate system. Climate Dynamics, 29(1), 73-88.

Webster, Melinda A., Ignatius G. Rigor, Son V. Nghiem, Nathan T. Kurtz, Sinead L. Farrell, Donald K. Perovich, and Matthew Sturm., 2014. =Interdecadal changes in snow depth on Arctic sea ice. Journal of Geophysical Research: Oceans 119, no. 8 (2014): 5395-5406.

Xu, W., Ma, L., Ma, M., Zhang, H., & Yuan, W., 2017. Spatial–temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai–Tibetan Plateau. Journal of Climate, 30(4), 1521-1533.

Zhang, X., & Wang, K., 2018. April. Spatial pattern and Internal Annual Variability in Observed Snow Depth over China from 1960 to 2014. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 20, p. 19696).